

DOI: 10.15593/2224-9982/2015.41.01

УДК 662.2:658.567.5

**М.В. Попова<sup>1</sup>, А.В. Литвинов<sup>1</sup>, С.Н. Козлов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ОАО ФНПЦ «Алтай», Бийск, Россия

<sup>2</sup> Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

## **СИСТЕМНАЯ ФОРМАЛИЗАЦИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОГНЕВОЙ УТИЛИЗАЦИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЗАРЯДОВ РДТТ НА ОТКРЫТОМ СТЕНДЕ**

Применительно к структуре информационно-управляющей системы «Экология» рассмотрены вопросы физико-математической формализации газодинамических процессов, протекающих в струе и облаке продуктов сгорания твердотопливных зарядов при их огневой утилизации на открытом стенде с применением водной экологической защиты. По мнению авторов, сложная картина и многофакторность процессов не позволяет достоверно формализовать их детерминированными методами, поэтому предлагается информационные потоки по параметрам процессов разделить по аналогии с радиотехникой на «сигнал» и «шум», используя для описания сигнала инженерные модели струи и облака продуктов сгорания, а все виды неопределенностей вынести в «шумовую» область, величину которой определять статистической обработкой результатов сжиганий зарядов и использовать эти данные при оценке экологического риска. Исходя из этого в статье предложены аналитические зависимости для определения параметров струи и облака продуктов сгорания, выбраны контрольные параметры и разработаны схемы идентификации этих зависимостей по результатам статических сжиганий заряда, исследована чувствительность выбранных моделей к управляющему воздействию – расходной характеристике водной экологической защиты по воде, даны определения экологических рисков. Показано, что выбранные аналитические модели струи и облака продуктов сгорания отвечают требованиям управляемости, идентифицируемости, адаптивности и могут использоваться в структуре информационно-управляющей системы «Экология».

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, экологический риск, статическое сжигание, огневая утилизация, физико-математическая модель, многофакторные процессы, энергетическая установка, информационно-управляющая система, системный анализ, техническая система, проектирование информационных систем.

**M.V. Popova<sup>1</sup>, A.V. Litvinov<sup>1</sup>, S.N. Kozlov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> OJSC "Altay", Biysk, Russian Federation

<sup>2</sup> Biysk Technological Institute, Biysk, Russian Federation

## **SYSTEMIC FORMALIZATION AND IDENTIFICATION OF PROCESSES AT FIRING UTILIZATION OF LARGE-SIZE SOLID ROCKET MOTOR CHARGES AT AN OPEN TEST BENCH**

Issues of physico-mathematical formalization of gas-dynamic processes occurring in jet and cloud of combustion products of solid propellant charges on their firing utilization at an open test bench equipped with water ecological protection have been considered as applied to the structure of the information-controlling system Ecology. In the authors' opinion the complicated picture and multi-factor processes do not make it possible to formalize them reliably by determined methods. Therefore, they suggested dividing data flows into process parameters as signal and noise, as accepted in radio-engineering, using for signal description engineering models of a jet and a cloud of combustion products and transferring all kinds of uncertainties into the noise field, its value to be determined by static treatment of results of charge combustions for evaluating ecological risk. Based on this, analytical relationships to define parameters of a jet and a cloud of combustion products have been proposed in the paper. Control parameters have been selected and schemes to identify these relationships on the base of static firing results have been developed. Response of the models selected to the control effect – water discharge characteristic of water ecological protection has been studied and definitions have been given. The selected analytical models of combustion products jet and cloud are shown to meet the requirements of controllability, identifiability, adaptability and can be used in the structure of the information-controlling system Ecology.

**Keywords:** ecological safety, ecological risk, static firing, firing utilization, physic-mathematical model, multi-factor processes, power plant, information-controlling system, systems analysis, technical system, information systems design.

В статье [1] рассмотрена методология создания информационно-управляющей системы под задачи огневой утилизации твердотопливных зарядов крупногабаритных ракетных двигателей на открытом стенде при действии водной экологической защиты (ВЭЗ). По разработанной ФНПЦ «Алтай» технологии статических сжиганий (СтС) предусмотрено сжигание твердотопливного заряда в двигателе без соплового блока, при этом в процессе горения заряда струя продуктов сгорания (ПС) орошается водой из коллекторов (рис. 1), расположенных вдоль струи ПС, что позволяет осадить большую часть вредных компонентов (ВК) ПС в рабочей зоне стенда.

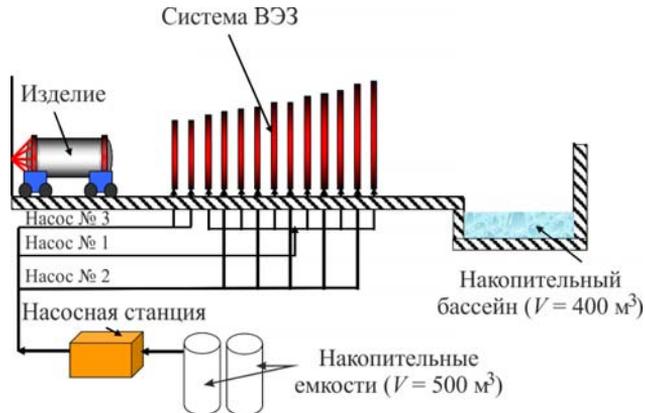


Рис. 1. Схема подачи воды в коллекторы

Структурно схема контроля и обеспечения экологической безопасности (ЭБ) стенда представлена как управляемая техническая система открытого типа с регулятором непрямого действия, в которой регулируемым параметром является концентрация ВК ПС на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ), а регулирующим элементом – расходная характеристика ВЭЗ по воде.

Применительно к рассматриваемой задаче такой подход, на наш взгляд, является единственно возможным, поскольку:

- объединяет все процессы, а также входные и выходные параметры в единую систему и позволяет рассматривать задачу контроля и обеспечения ЭБ в рамках теории технических и информационных систем;
- позволяет объединить детерминированные и стохастические методы для формирования и последующего параметрического исследования системы.

Действительно, основу блока управления информационно-управляющей системы (ИУС) составляют концептуальные логические модели, которые разрабатываются на основе физико-математических моделей процессов, протекающих в системе. При этом физико-математические модели процессов должны обеспечить основные характеристики ИУС – управляемость, идентифицируемость и адаптивность.

Под *управляемостью* понимается способность системы реагировать на изменение ее входных параметров. При этом качество и эффективность управления зависит от правильности выбора параметров, используемых для управления системой.

Под *идентификацией* понимается установление соответствия между результатами математического моделирования и результатами экспериментального определения контролируемых параметров системы. При этом, если вход  $\vec{X}$  и выход  $\vec{Y}$  системы объединены оператором соответствия  $A$ :  $\vec{Y} = A\vec{X}$ , то задача идентификации состоит в определении оператора  $A$  по результатам сравнения расчетных и опытных данных.

Под *адаптацией* понимается способность системы к повышению качества управления в процессе испытаний или эксплуатации за счет уточнения, по мере набора статистических данных по параметрам оператора  $A$ , и повышения точности идентификации.

Используемые в ИУС «Экология» функциональные модели, разрабатываемые на основе детерминированных математических моделей регулятора и распределителя, должны обеспечивать все перечисленные свойства ИУС и включаться в систему только после проверки на соответствие этим требованиям. Поэтому выбор физико-математических моделей процессов играет ключевую роль в формировании блока управления и обеспечения эффективности ИУС.

Основными в системе ЭБ являются:

- газодинамические процессы в струе ПС, орошаемой водой;
- газотермодинамические процессы, определяющие состояние облака ПС, которое после орошения струи поднимается, расширяется и рассеивается в атмосфере.

В обоих случаях состояние и струи, и облака ПС обуславливается взаимодействием многих процессов, которые практически невозможно описать в рамках каких-либо существующих детерминированных подходов. Использование численных методов [2] не помогает: они позволяют построить многопараметрические модели, обеспечить любую требуемую вычислительную точность, но адекватность их действительно существующему описываемому моделью процессу зависит от достоверности исходных посылок, которые не всегда можно корректно сформулировать. Кроме того, высокая трудоемкость вычислений ограничивает их возможность для параметрических исследований системы и ее численной оптимизации. С учетом этого применительно к формированию блока управления ИУС целесообразно рассматривать инженерные упрощенные модели, позволяющие выделить основные действующие процессы, а второстепенные факторы и различные виды неоп-

ределенностей вынести в «шумовую зону», т.е., по аналогии с радиотехническими системами, разделить информационный поток по параметрам процессов на сигнал и шум. Это позволит формализовать концептуальные и логические модели блока управления ИУС и обеспечить все основные показатели этой системы: управляемость, идентифицируемость, адаптивность. Рассмотрим этот методический подход для каждой из подсистем ИУС – регулятора и распределителя.

*1. Регулятор: орошаемая струя ПС.*

Исходной базой для построения математической модели регулятора является структура струи ПС, образующейся при горении заряда, и газотермодинамические процессы, протекающие в струе при ее орошении водой.

Физика процессов в свободно истекающих высокоскоростных, высокотемпературных струях изучена достаточно хорошо в работах Г.Н. Абрамовича [3], И.П. Гинзбурга [4] и др. Однако при проведении СтС в двигателе без соплового блока с орошением струи ПС водой через коллекторы, расположенные вдоль струи, существенно меняется газодинамическая картина струи ПС, при этом необходимо учитывать следующие факторы:

1. Сжигание заряда в корпусе двигателя без соплового блока меняет газодинамическую картину течения ПС внутри заряда [5] – в начальный период горения критическое сечение для ПС располагается внутри канала заряда и по мере его разгорания перемещается в сторону выходного сечения корпуса. Этот процесс необходимо учитывать при расчетном определении массового расхода ПС по результатам замера давления в двигателе, которое на начальном участке разгара канала заряда снижается с 1,0 до 0,2 МПа и фиксируется на этом уровне при стабилизации критического сечения в выходном сечении корпуса.

Поэтому при разработке алгоритмов управления целесообразно рассматривать два участка горения заряда (рис. 2):

1) высоконапорный (ВНУ) – соответствующий периоду разгара внутреннего канала заряда, на котором давление снижается до минимального;

2) низконапорный (ННУ) – в течение которого критическое течение устанавливается в выходном сечении корпуса и давление в двигателе поддерживается на уровне 0,20–0,25 МПа.

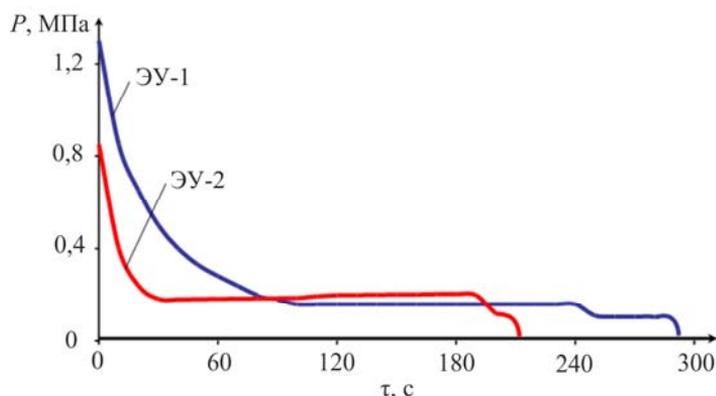


Рис. 2. Диаграммы давления (избыточного) в ЭУ-1, 2

2. Горение заряда в двигателе без соплового блока протекает при пониженном, относительно штатного режима, давлении в камере сгорания (0,2–1,0 МПа вместо 7–10 МПа в штатных двигателях), что приводит к значительному снижению полноты сгорания топлива и, соответственно, к снижению температуры ПС. Этот факт подтвержден экспериментально [6, 7] и должен учитываться при расчете температуры струи ПС.

3. Как показывает анализ, в течение всего времени горения заряда при СтС струя ПС истекает из двигателя в надкритическом, т.е. сверхзвуковом, режиме и переходит в дозвуковой режим течения через серию скачков уплотнения, которые образуют переходный участок – «бочку». Поскольку ввод воды в струю на сверхзвуковом участке мало эффективен при давлении подачи воды 0,5–1,0 МПа, то при разработке конструкции и схемы расположения коллекторов системы орошения необходимо учитывать газодинамическую структуру струи и проводить расчетное обоснование оптимального их расположения по длине струи.

4. Энергия свободно истекающих струй расходуется на работу расширения и увеличение кинетической энергии струи [8]. При орошении струи водой возникают затраты энергии на массообмен [9], что снижает энтальпию и кинетическую энергию струи, приводит к снижению ее температуры и скорости, однако при этом расходы энергии на работу расширения не исчезают. Эту особенность энергетического баланса струи ПС необходимо учитывать при разработке расчетного алгоритма.

5. При орошении струи возникает сложная картина взаимодействия воды и струи ПС. Условно можно нарисовать следующую виртуальную схему: при подаче воды в струю ПС через кольцевые коллекторы, расположенные по внешнему контуру струи, создается водяной «чулок» с тремя слоевыми зонами:

– в 1-й зоне вода проникает в струю, испаряется и взаимодействует с компонентами ПС. Толщина  $h$  этой зоны и, соответственно, степень орошения струи зависят от соотношения гидродинамических напоров струи ПС и воды и увеличиваются по мере торможения струи ПС;

– во 2-й зоне реализуется только поверхностный контакт между водой и струей ПС, вследствие этого вода, не проникая в струю ПС, нагревается и испаряется;

– в 3-й зоне вода не контактирует со струей ПС и полностью сливается на пол огневого двора.

Эти зоны можно рассматривать чисто условно, поскольку значительную роль в протекании процессов играет динамика истечения струи. Действительно, длина огневого двора составляет  $\approx 100$  м. На этом участке скорость течения струи меняется от  $\approx 900$  до  $\approx 100$  м/с, а температура от 1900 до 400 К, т.е. при средней скорости течения струи  $\approx 500$  м/с ПС преодолевают это расстояние за 0,2 с с градиентом по скорости течения струи  $\approx 4 \cdot 10^3$  м/с<sup>2</sup>, по температуре  $\approx 7,5 \cdot 10^3$  К/с. Это должно приводить к неравновесности и незавершенности практически всех физико-химических процессов взаимодействия воды и ПС в струе [10].

С учетом перечисленных факторов построение базовой физико-математической модели регулятора включает в себя:

- расчет давления и температуры в камере сгорания двигателя;
- расчет газотермодинамических параметров орошаемой и неорошаемой струй по их длине;
- покомпонентный расчет массовых характеристик струи ПС при действии ВЭЗ.

Расчет внутрибаллистических параметров внутри двигателя проводится в следующем порядке:

1. С использованием формулы Бори, исходя из поверхности горения с учетом разгара канала заряда, рассчитывается диаграмма изменения давления во времени в камере двигателя:

$$P_k(\tau) = \left( \frac{S(e)u_1\rho}{AF_{кр}} \right)^{\frac{1}{1-\nu}},$$

где  $S(e)$  – площадь поверхности заряда в функции свода;  $\rho$  – плотность топлива;  $A$  – коэффициент истечения;  $F_{кр}$  – площадь критического сечения, определяемого с учетом соотношения площадей поверхности горения и проходного сечения канала заряда;  $\nu$  – показатель зависимости скорости горения от давления  $u = u_1 P^\nu$ .

Полученная расчетная функция  $P_k(\tau)$  сравнивается с осциллограммой давления, полученной при СтС.

2. Для диаграммы  $P_k(\tau)$  с использованием температурных коэффициентов  $K_T$  табл. 1 определяется температура  $T(\tau_i)$  в камере сгорания:

$$T_{0_i}(\tau_i, P_{k_i}) = T_0 K_T(P_{k_0}).$$

Таблица 1

Температурный коэффициент

$P_k, \text{ кгс/см}^2$	40	20	14	10	8	6	4	2	1
$K_T = \frac{T(p_i)}{T_0}$	1,00	0,98	0,96	0,94	0,91	0,88	0,84	0,70	0,62

Величина коэффициента  $K_T$  определена по результатам работ [6, 7].

3. Рассчитываются значения критической скорости звука по формуле

$$a_{кр} = \sqrt{\frac{2kRT_i}{k+1}},$$

при этом ориентировочно могут быть приняты  $R = 291,30 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$ ,  $k = 1,14 \dots 1,20$ . Конкретно для каждого РДГТ эти величины уточняются по паспортным характеристикам топлива.

4. Определяются параметры ПС в выходном сечении для каждого  $i$ -го момента времени:

- скорость истечения  $W_a = \lambda a_{кр}$ ;
- давление  $P_a = P_k \pi(\lambda_a)$ ;

– температура  $T_a = T_0 \tau(\lambda_a)$ .

Здесь  $\pi(\lambda_a)$ ,  $\tau(\lambda_a)$  – газодинамические функции [11].

5. Массовый расход истекающих газов определяется по формуле

$$\dot{m}_{\text{ПС}} = APF_{\text{кр}},$$

где  $A = \varphi_2 \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{g}{\sqrt{RT_a}}}$ ,  $\varphi_2 = 0,98 \dots 1,0$ , при этом  $F_{\text{кр}}$  для началь-

ного высоконапорного участка определяется исходя из геометрии разгорающегося канала заряда.

Полученные функции  $P_a(\tau)$ ,  $T_a(\tau)$ ,  $\lambda_a(\tau)$ ,  $W_a(\tau)$  служат исходными данными для расчета параметров струи ПС в зоне стенда.

Расчет параметров *неорошаемой струи* проводится с учетом следующих факторов.

Как показано ранее, при работе без соплового блока критическое сечение потока, в котором  $\lambda = 1$ , устанавливается во внутреннем канале заряда и по мере его разгорания перемещается в сторону выходного сечения двигателя с диаметром  $d_a$ , где окончательно позиционируется. В любом случае в атмосферу выходит сверхзвуковая струя, которая через серию скачков уплотнения переходит в дозвуковую с давлением, равным  $p_n$ , и далее изобарически расширяется с уменьшением скорости и температуры потока по длине струи вследствие затрат энергии на расширение. При этом диаметр струи увеличивается [3, 4].

Структура и форма начального участка определяются соотношением давлений на выходе из двигателя  $P_a$  и окружающей среды  $p_n$   $\left( n = \frac{P_a}{P_n} \right)$ : при  $n > 2$  начальный участок состоит из одной «бочки», содержащей ударные волны, а при нерасчетностях, близких к единице, будет содержать несколько «бочек» [4], при этом

– максимальный диаметр «бочки» определяется по формуле

$$\frac{d_{\text{max}}}{d_a} = 1,244n^{0,6};$$

– длину начального газодинамического участка можно оценить по формуле

$$l_0 \approx \frac{4d_a \cdot n}{1,2 + 0,3n}.$$

Понимание структуры начального участка истечения ПС важно для проведения системного анализа и расчета параметров струи в зоне расположения водных коллекторов ВЭЗ, которые целесообразно располагать на участке струи после ее перехода в дозвуковой режим течения.

При расчете неорошаемой струи скорость и температура на переходном участке условно принимаются постоянными и равными  $W_{xn} = W_a$ ,  $T_{xn} = T_a$ .

В качестве примера в табл. 2 и на рис. 3 приведены форма и размеры переходных участков струи для высоконапорного и низконапорного участков.

Таблица 2

Размеры переходного участка струи ПС в зависимости от давления в камере

$P_k$ , кг/см <sup>2</sup>	$P_a$ , кг/см <sup>2</sup>	$d_{max}$ , м	$l$ , м
30	15,7	2,5	4,2
20	10,5	1,9	3,8
10	5,2	1,3	2,9
5	2,619	0,8	2,1
2	1,048	0,5	1,1

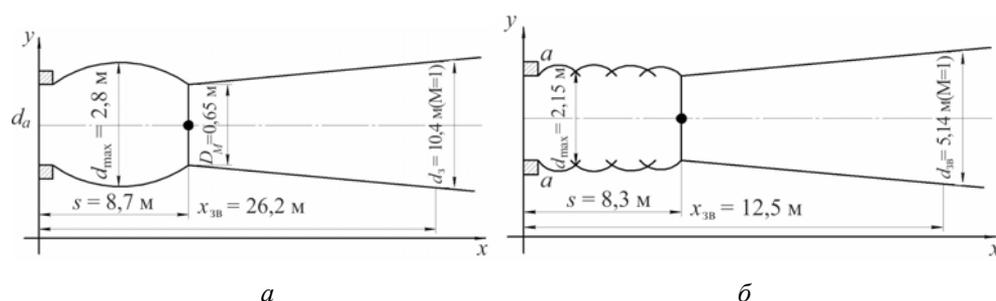


Рис. 3. Расположение и схемы переходного участка струи ПС: а – высоконапорный участок; б – низконапорный участок

Расчет изменения скорости и температуры ПС по оси струи после перехода ее в дозвуковой режим проводится по следующим зависимостям [3, 4]:

$$W_x = W_a \frac{6,35 \cdot d_a}{x},$$

где  $W_x$  – скорость потока ПС на оси струи;  $x$  – расстояние от координаты диска Маха;  $d_a$  – радиус выходного сечения.

$$T_x = T_n + (T_a - T_n) \cdot \frac{5,45 \cdot d_a}{x},$$

где  $T_x$  – температура потока ПС на оси струи;  $T_n$  – температура окружающей среды.

Приведенные зависимости получены аппроксимацией экспериментальных данных и учитывают работу изоэнтропического расширения потока [3, 12].

Параметры *струи при орошении* могут быть определены следующим образом [13]. При истечении расширяющейся струи ПС энергия потока содержит две составляющие (тепловую и кинетическую) и может быть записана в виде

$$E = i + A \frac{w^2}{2g} = C_p T + A \frac{w^2}{2g},$$

где  $i$  – энтальпия потока;  $A$  – тепловой эквивалент механической работы,  $A = \frac{1}{102}$  кДж/кг;  $C_p$  – теплоемкость ПС при постоянном давлении;  $T$  – температура;  $w$  – скорость потока.

При орошении вода вводится в струю через последовательно расположенные вдоль струи кольцевые коллекторы, вследствие чего образуется термодинамическое тело переменной массы [9], при этом энергия потока расходуется дополнительно к работе расширения на массообмен между водой и ПС и на испарение воды, поступающей в струю ПС. Если принять допущение о мгновенности взаимодействия, то параметры струи ПС в каждом сечении струи, соответствующем расположению водяного коллектора, будут определяться следующими законами газодинамики свободных струй:

– закон сохранения массы в виде

$$\dot{m}_{r(n+1)} = \dot{m}_{r(n)} = \dot{m}_{rn} + \dot{m}_{вn}, \quad (1)$$

где  $\dot{m}_{rn}$  – секундный массовый расход газов через сечение впрыска  $n$ -й ступени коллектора;  $\dot{m}_{вn}$  – секундный расход воды при впрыске в  $n$ -й

ступени коллектора;  $\dot{m}_{\Gamma(n+1)}$  – секундный расход газов после впрыска воды в  $n$ -й ступени коллектора;

– равнение количества движения в виде

$$\dot{m}_x W_x = \dot{m}_{\Gamma(n+1)} W_{n+1} = (\dot{m}_{\Gamma n} + \dot{m}_{\text{Вн}}) W_{n+1}, \quad (2)$$

где  $W_x$  – скорость движения ПС на оси струи;  $\dot{m}_x$  – расход ПС на оси струи;

– закон сохранения энергии в виде

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\Gamma(n+1)} \left( C_{p\Gamma(n+1)} T_{\Gamma(n+1)} + A \cdot \frac{W_{\Gamma(n+1)}^2}{2g} \right) = \dot{m}_{\Gamma n} \left( C_{p\Gamma n} T_{\Gamma n} + A \cdot \frac{W_{\Gamma n}^2}{2g} \right) - \\ - \dot{m}_{\text{Вн}} \left( C_{p\text{Вн}} \Delta T_{\text{н}} + r + \frac{1}{2} \cdot A \cdot \frac{W_{\text{Вн}}^2}{2g} \right). \end{aligned}$$

Здесь в соответствии с зависимостью (1) из энтальпии газа перед впрыском воды вычитается энтальпия, необходимая для нагрева воды до температуры кипения и парообразования. В этой формуле приняты следующие обозначения:  $A$  – тепловой эквивалент механической работы,  $A = \frac{1}{102}$  кДж/кг;  $\Delta T_{\text{н}}$  – температура нагрева воды до точки кипения;  $r$  – скрытая теплота парообразования,  $r = 2200$  кДж/кг.

Теплоемкость газов после впрыска воды определяется по формуле

$$C_{p\Gamma(n+1)} = C_{p\Gamma n} \cdot \frac{\dot{m}_{\Gamma n}}{\dot{m}_{\Gamma(n+1)}} + C_{p\text{Вн}} \cdot \frac{\dot{m}_{\text{Вн}}}{\dot{m}_{\Gamma(n+1)}}.$$

Тогда из формулы (2) определяется температура ПС после впрыска воды:

$$\begin{aligned} T_{\Gamma(n+1)} = \frac{\dot{m}_{\Gamma n}}{\dot{m}_{\Gamma(n+1)} C_{p\Gamma(n+1)}} \cdot \left( C_{p\Gamma n} T_{\Gamma n} + A \cdot \frac{W_{\Gamma n}^2}{2g} \right) - \frac{\dot{m}_{\text{Вн}}}{\dot{m}_{\Gamma(n+1)}} C_{p\text{Вн}} \times \\ \times \left( C_{p\text{Вн}} \Delta T_{\text{н}} + r + \frac{1}{2} A \frac{W_{\text{Вн}}^2}{2g} \right). \end{aligned}$$

При оценке массообмена между водой и ПС необходимо учитывать, что глубина проникновения воды в струю ПС зависит от соотношения гидравлических напоров струи воды и ПС; приближенно эта величина для каждого коллектора может быть определена по формуле

$$h = d \cdot \left( 13 + \frac{2P_B \sqrt{\varphi}}{kM^2 P_\Gamma} \right), \quad (3)$$

где  $P_B$  – давление подачи воды из коллектора;  $P_\Gamma$  – давление в струе ПС,  $P_\Gamma = P_\kappa \pi(\lambda)$ ;  $M$  – число Маха для скорости потока в данном сечении;  $d$  – диаметр отверстий коллектора;  $k$  – коэффициент изоэнтропы;  $\varphi = \sqrt{\frac{G_B}{\dot{m}_\Gamma}} k$  – коэффициент напора.

С учетом этого коэффициент орошения струи для каждого  $i$ -го сечения впрыска воды

$$k_{\text{оп}} = \frac{R_\kappa^2 - (R_\kappa - h)^2}{P_\kappa^2} = 1 - \frac{(R - h)^2}{R^2},$$

где  $R_\kappa$  – радиус коллектора по центрам расположения отверстий.

Тогда масса воды, израсходованная на орошение струи, приближенно

$$m_B^{\text{оп}} = m_B^\Sigma \cdot \bar{k}_{\text{оп}},$$

где  $m_B^\Sigma = \int_0^{\tau_B} G_B(x, \tau) \cdot d\tau$  – общий расход воды на орошение ПС при работе системы ВЭЗ;

$\bar{k}_{\text{оп}}$  – средний коэффициент орошения,  $\bar{k}_{\text{оп}} = \frac{1}{n} \sum_i^n k_{\text{оп}i}$

по всем  $i = 1 \dots n$  коллекторам.

Приведенные зависимости позволяют определить все параметры струи ПС –  $T$ ,  $W$ ,  $P$ , исходя из расходной характеристики ВЭЗ  $G_B(x, \tau)$ , а также степень орошения струи по количеству воды  $m_B^{\text{оп}}$ , проникшей в струю.

Эта величина, исходя из зависимости (3), должна увеличиваться по мере выгорания заряда, снижения давления в камере двигателя и по длине струи ПС по мере ее торможения.

С учетом рассмотренной ранее схемы взаимодействия воды со струей ПС может быть определен баланс масс воды следующим образом.

Вода, подаваемая из коллекторов для орошения струи ПС, распределяется следующим образом:

- часть  $m_B^{сл}$  – не входит в струю и напрямую сливается на пол;
- часть  $m_B^{исп}$  – испаряется при поверхностном контакте со струей ПС;
- часть  $m_B^{вн}$  – входит внутрь струи, при этом часть ее  $m_B^{вн,исп}$ , захватив часть ПС, испаряется, а часть  $m_B^{вн,ос}$ , захватив ПС, осаждается на пол огневого двора, т.е. в технологические стоки.

По длине струи соотношение между этими частями будет меняться.

Тогда баланс масс воды

$$m_B^{\Sigma} = m_B^{сл} + m_B^{исп} + m_B^{вн},$$
$$m_B^{\Sigma} = m_B^{сл} + m_B^{исп} + m_B^{вн,исп} + m_B^{вн,ос}.$$

Отсюда следует, что только часть подаваемой воды эффективно используется для осаждения ПС в рабочей зоне стенда. Если эта доля мала, то увеличение расхода воды неэффективно.

Этот фактор необходимо учитывать при оценке эффективности ВЭЗ и анализе чувствительности подсистемы регулятора при выборе управляющей функции.

#### *Идентификация регулятора.*

Для регулятора как подсистемы ИУС «Экология» должны быть определены контрольные параметры и порядок идентификации функциональной модели. При этом должны быть выбраны:

- а) контрольные параметры регулятора, по которым проводится идентификация;
- б) идентификационные характеристики для подгонки модели к идентифицируемому процессу.

Для идентификации могут быть использованы:

- результаты натуральных СтС и модельных огневых испытаний;
- результаты расчетно-теоретических исследований процессов или их отдельных элементов на основе математически точных числен-

ных методов решения уравнений газовой динамики. Применительно к рассматриваемому вопросу в качестве таковой может использоваться методика ФНПЦ «Алтай» [2], позволяющая на основе численных методов проводить расчетные исследования термогазодинамических параметров струи, состоящей из смеси ПС, паров воды и атмосферного воздуха. Такая модель может рассматриваться как опорная модель в цилиндрической системе координат на основе укороченных уравнений Навье – Стокса. Методика позволяет исследовать взаимодействие ПС и паров воды и проводить параметрическую оценку газодинамической структуры орошаемой струи в любом ее сечении.

Функциональным назначением регулятора является осаждение ВК ПС в рабочей зоне стенда. Исходя из этого эффективность регулятора как подсистемы должна оцениваться по степени «очищения» струи ПС от ВК. Такую оценку позволяют проводить результаты аналитического контроля содержания  $Al_2O_3$  и  $HCl$  в технологических стоках, собранных в бассейне-отстойнике. В свою очередь, степень осаждения ВК в рабочей зоне стенда коррелирована со степенью торможения струи ПС перед бассейном, вследствие чего перед бассейном уменьшаются ее скорость и температура  $W_k, T_k$  до конечных величин.

С учетом этого в качестве контрольных параметров регулятора целесообразно использовать:

– массу и долю осажденных в рабочей зоне стенда  $Al_2O_3$  и  $HCl$ :

$$m_{OA}^{OC}, m_{XB}^{OC}, k_{OA}^{OC} = \frac{m_{OA}^{OC}}{m_{\Sigma}^{OC}}, k_{XB}^{OC} = \frac{m_{XB}^{OC}}{m_{\Sigma}^{OC}};$$

– температуру струи ПС на конечном участке струи перед бассейном  $T_k$ .

Использование температуры струи для контроля целесообразно, поскольку:

– существующие инструментальные средства позволяют измерять температуру с относительно небольшими погрешностями, а датчики могут быть размещены в нескольких точках по длине струи;

– температура функционально связана со скоростью потока, что позволяет косвенно оценивать и этот параметр струи ПС на ее конечном участке.

Эти же параметры используются в качестве контрольных и при идентификации функциональной модели, при этом температура  $T_k$

может контролироваться как для орошаемой струи, так и для струи без орошения, что позволяет повысить информативность идентификации.

В качестве начального этапа проводится точно-параметрическая идентификация функциональной модели регулятора в следующей последовательности (схема на рис. 4).

1. Идентификация функциональной модели неорошаемой струи ПС по конечной температуре. По результатам сравнения опытной и расчетной температур  $T_k$  в конце струи ПС корректируется начальная температура струи  $T_0$  на величину  $T'_0$ .

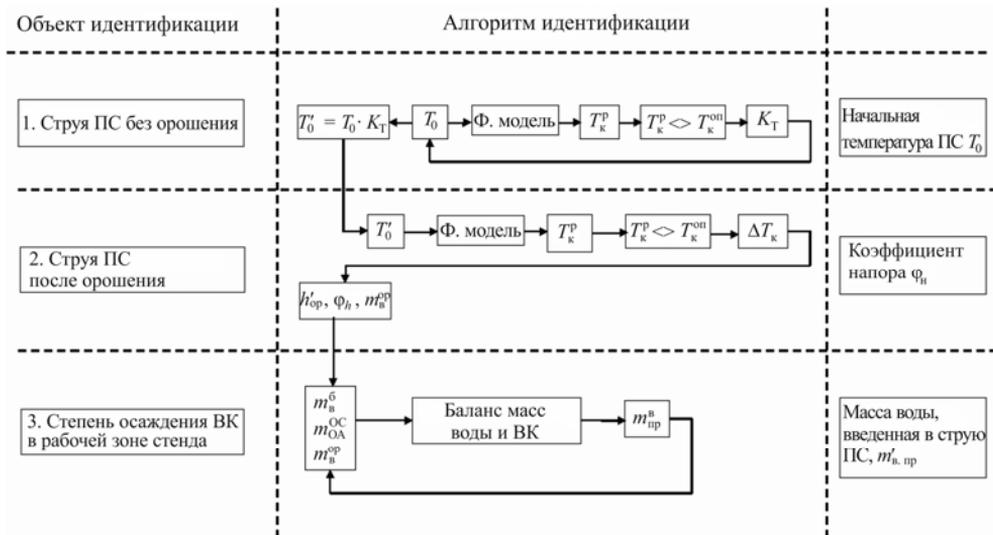


Рис. 4. Схема идентификации

2. Исходя из откорректированной величины температуры  $T'_0$  проводится расчет параметров струи ПС для заданной расходной характеристики  $G_B(x, \tau)$ , определяется конечная температура  $T_k^{p'}$  и сравнивается с опытным значением  $T_k^{оп'}$ . Принимается, что расхождение опытной и расчетной температур  $T_k^{оп'} < > T_k^{p'}$  возникает вследствие неопределенностей в оценке степени орошения струи. Подгонка модели проводится за счет корректировки глубины проникновения воды в струю ПС:

$$h(x, \tau) = d \cdot \left( 13 + \frac{2P_B \sqrt{\varphi_H \frac{G_B}{G_{\dot{m}}}}}{kM^2 P(x)} \right),$$

путем изменения коэффициента напора  $\varphi_H$ . В результате определяются величины  $h'(x, \tau)$  и масса воды, вошедшая в струю ПС  $m_B^{BH'}$ .

3. Идентификация эффективности осаждения ВК проводится по балансу масс воды, пошедшей на орошение. В качестве исходных параметров используются:

– масса воды в бассейне  $m_B^{OC}$  – по результатам замеров;

– масса оксида алюминия в технологических стоках  $m_{OA}^{OC}$  и доля

его осаждения:  $k_{OA}^{OC} = \frac{m_{OA}^{OC}}{m_{OA}^{\Sigma}}$  – по результатам замеров в бассейне;

– масса воды, вошедшая в струю ПС,  $m_B^{BH'}$ .

Из структуры орошаемой струи следует, что часть воды, вошедшая в струю, испаряется, а другая часть обеспечивает осаждение ВК из струи:  $m_B^{\Sigma} = m_B^{OC} + m_B^a$ . В частности, в работе [10] показано, что хлористый водород образует хлористую кислоту с выделением тепла, достаточного для ее закипания и выделения газообразной HCl даже на конечном участке струи при температуре 110–70 °С.

С учетом этого логично оценить массу воды, израсходованной на осаждение ВК, по степени осаждения  $Al_2O_3$ , образующего в конце струи твердые компоненты:

$$m_B^{BH,OC} = m_B^{BH} \cdot k_{OA}^{OC},$$

где  $k_{OA}^{OC} = \frac{m_{OA}^{OC}}{m_{OA}^{\Sigma}}$ .

Эти соотношения позволяют определить все компоненты массового баланса воды и ВК и их распределение между рабочей зоной стенда и атмосферой.

*Чувствительность* выхода ко входным параметрам определяет степень управляемости системы. Требуемые параметры расходной характеристики  $G_B(x, \tau)$  обеспечиваются:

- количеством и координатами размещения коллекторов;
- диаметром отверстий для воды;
- давлением подачи воды.

Кроме того, при анализе чувствительности необходимо учитывать, что количественно (а не функционально) степень зависимости между выходом и входом регулятора будет различной на высоко- и низконапорных участках горения заряда, что следует из зависимости (3).

Исходные алгоритмы, принятые для разработки функциональной модели регулятора, позволяют учесть все эти факторы, исследовать влияние на выходные параметры регулятора на основе численного моделирования зависимостей и проводить оптимизацию расходной характеристики  $G_B(x, \tau)$  путем соответствующего размещения коллекторов, выбора диаметров для подвода воды и давления подачи воды. На начальном этапе для такой оптимизации проводится однопараметрическое исследование влияния расхода воды на температуру и скорость струи на конечном этапе ее расширения после орошения и степень орошения струи.

Для иллюстрации возможностей принятой для ИУС «Экология» функциональной модели регулятора на рис. 5–9 приведены зависимости скоростей, температуры и степени орошения струи ПС от среднего секундного расхода воды.

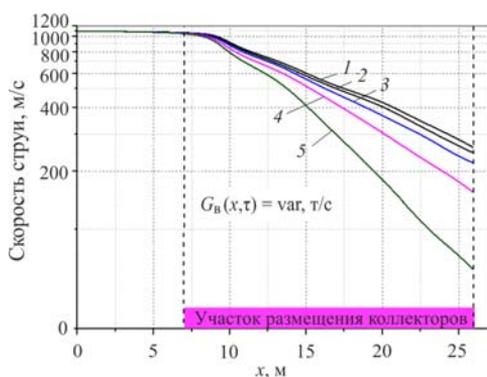


Рис. 5. Изменение скорости струи ПС на ВНУ в зависимости от среднего расхода воды  $G_B(x, \tau)$ : 1 –  $G_B = 0$  т/с; 2 –  $G_B = 0,2$  т/с; 3 –  $G_B = 0,4$  т/с; 4 –  $G_B = 1,0$  т/с; 5 –  $G_B = 2,0$  т/с

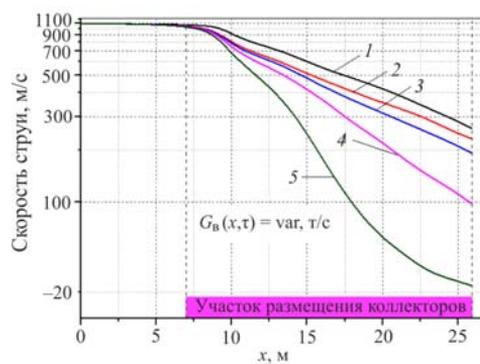


Рис. 6. Изменение скорости струи ПС на ННУ в зависимости от среднего расхода воды  $G_B(x, \tau)$ : 1 –  $G_B = 0$  т/с; 2 –  $G_B = 0,2$  т/с; 3 –  $G_B = 0,4$  т/с; 4 –  $G_B = 1,0$  т/с; 5 –  $G_B = 2,0$  т/с

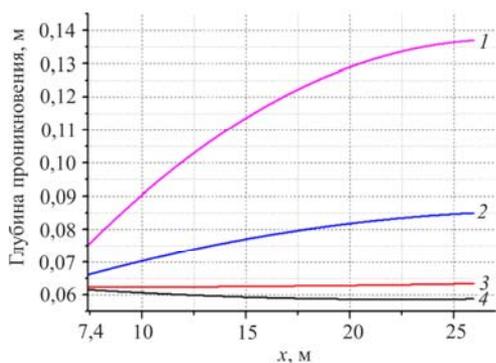


Рис. 7. Глубина проникновения воды в струю ПС на ВНУ по длине струи в зависимости от среднего расхода воды  $G_B(x, \tau)$ : 1 –  $G_B = 2,0$  т/с; 2 –  $G_B = 1,0$  т/с; 3 –  $G_B = 0,4$  т/с; 4 –  $G_B = 0,2$  т/с

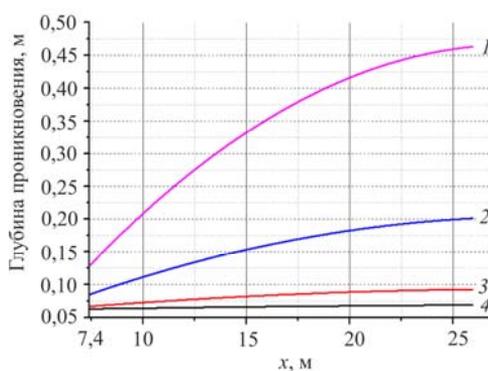


Рис. 8. Глубина проникновения воды в струю ПС на ННУ по длине струи в зависимости от среднего расхода воды  $G_B(x, \tau)$ : 1 –  $G_B = 2,0$  т/с; 2 –  $G_B = 1,0$  т/с; 3 –  $G_B = 0,4$  т/с; 4 –  $G_B = 0,2$  т/с

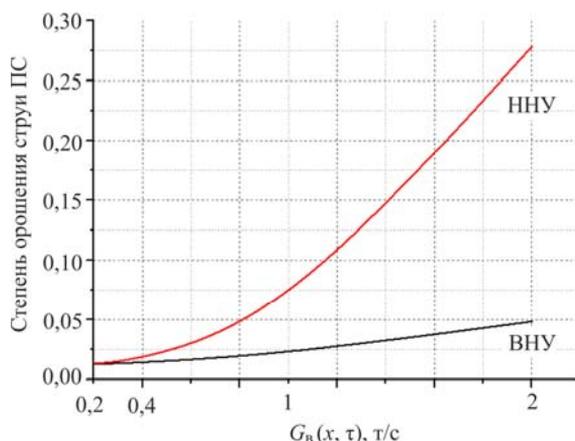


Рис. 9. Степень орошения струи ПС в зависимости от среднего расхода воды  $G_B(x, \tau)$

Из графиков, в частности, видно, что чувствительность всех параметров струи к изменению расхода воды существенно выше для низконапорного участка горения заряда, чем для высоконапорного.

Исследование зависимости степени осаждения ВК в рабочей зоне стенда от расхода воды представляет определенные трудности, поскольку проведение натурных СтС при различных расходах воды затруднительно вследствие их высокой стоимости. В этом случае может быть использована следующая схема оценки зависимости

$m_i^{OC} = f(G_B(x, \tau))$ , где  $i$  – ВК и вода. Если определена степень осажде-ния при некотором расходе  $G_B^0(x, \tau)$ , например  $G_B(x, \tau) = 2$  т/с, то эта точка используется в качестве первой опорной точки для построения искомым зависимостей (рис. 10).

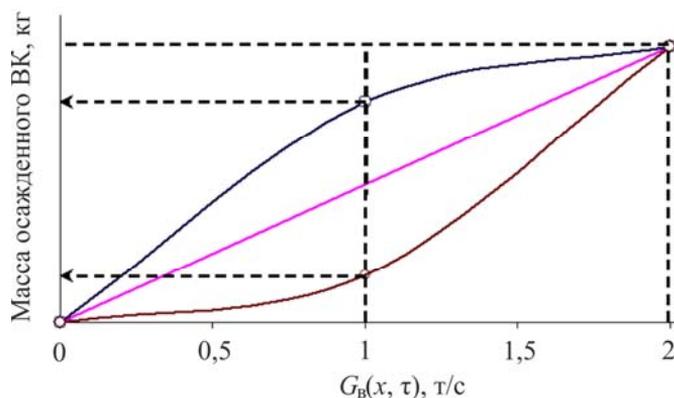


Рис. 10. Схема оценки зависимости  $m_i^{OC} = f(G_B)$

Вторую опорную точку дает СтС без орошения струи, при кото-ром  $G_B(x, \tau) = 0$  т/с и  $m_i^{OC} = 0$ . Это дает две точки для зависимости  $m_i^{OC}(G_B(x, \tau))$ , которая между этими точками может быть (см. рис. 10):

- линейной;
- выпуклой;
- вогнутой.

Проведение СтС при одном из промежуточных значений  $G_B(x, \tau) < G_B^0(x, \tau)$  позиционирует вид этой функции.

Таким образом, выбранная функциональная модель регулятора отвечает требованиям системы по чувствительности и позволяет обеспечить ее идентификацию и управление по расходной характе-ристике ВЭЗ.

*Адаптируемость.* Воздействие большого числа второстепенных «шумовых» факторов приводит к разбросу выходных параметров регу-лятора  $T_k$ ,  $W_k$ ,  $m_i^{OC}$ . Поэтому по мере проведения СтС и набора стати-стических данных проводится уточнение всех выходных параметров и их разбросов и, соответственно, уточнение зависимостей между рас-ходной характеристикой ВЭЗ и выходными параметрами регулятора.

*Распределитель: облако ПС при подъеме в атмосфере.*

В рамках подсистемы распределителя рассматривается облако ПС, которое формируется в процессе горения заряда и представляет собой аэрозольный термик, содержащий ВК, не осажденные в рабочей зоне стенда, пары воды и хлорной кислоты, содержание которых зависит от эффективности орошения струи ПС. Оксид алюминия в составе облака существует в виде твердых частиц  $k$ -фазы, размеры которых при среднем диаметре  $d_k = 5,5$  мкм подчиняются гамма-распределению с параметрами [13, 14]:

$$f(d) = 0,578d_k^{0,68} \cdot e^{-0,68}.$$

При разработке функциональной модели облака ПС необходимо учитывать следующие факторы:

1. Двухрежимность горения заряда при постоянной расходной характеристике ВЭЗ  $G_b(x, \tau) = \text{const}$  обуславливает слоистую структуру облака ПС. Физически это вызывается резким увеличением степени орошения струи по мере понижения давления в камере сгорания и соответственно расхода ПС.

Слоистость структуры облака ПС хорошо видна из рис. 11.

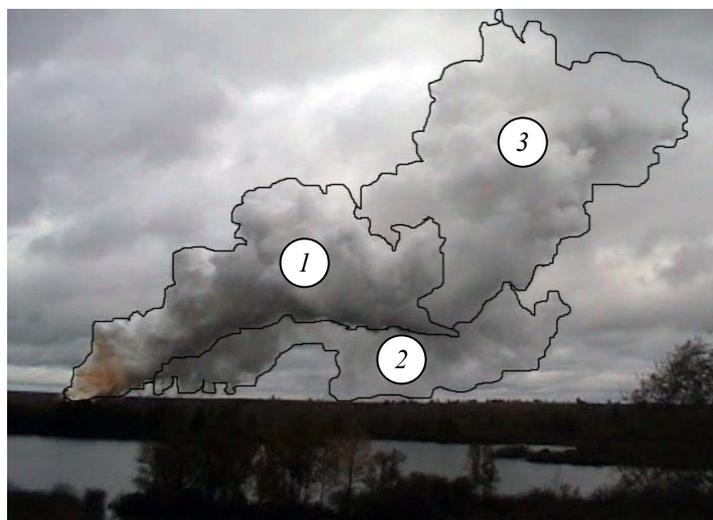


Рис. 11. Вид облака ПС: 1 – начальный участок; 2 – осадки; 3 – расширение и рассеивание

2. При подъеме термика изменяются его масса, габариты, температура и компонентный состав, которые зависят от следующих процес-

сов: эжекции атмосферного воздуха в облако при его подъеме; изменения агрегатного состояния его компонентов, в том числе конденсации паров воды и хлористой кислоты; формирования и выпадения (седиментации) аэрозолей и твердых частиц, при этом в качестве ядер конденсации могут служить твердые частицы  $k$ -фазы оксида алюминия.

Однако часть частиц оксида алюминия вымывается при орошении струи, а при подъеме облака может происходить их коагуляция [14]. Эти процессы не исследованы ни экспериментально, ни теоретически, вследствие чего достоверный учет этого фактора при анализе конденсации и седиментации компонентов ПС практически невозможен.

3. Одним из важных факторов, которые могут определять процессы седиментации ВК из облака, является пульсационный характер термодинамического состояния облака в процессе его подъема в атмосфере. Проведенные измерения температуры облака на основе метода инфракрасной сигнатуры с помощью регистратора тепловизионных изображений реального времени, а также определение траектории и формообразования облака с помощью двухракурсной съемки показали [15], что изменения температуры облака и его размеров носят периодический пульсационный характер с периодом 6–8 с.

Очевидно, это связано с неравновесным термодинамическим состоянием облака и пульсационным характером процессов конденсации и седиментации. Эти процессы носят высокочастотный характер (6–8 с на цикл по сравнению с 300 с времени горения заряда) и, видимо, не могут повлиять на интегральные показатели зон рассеивания ВК [16].

Для оценки динамики подъема облака ПС разработан ряд математических моделей [14, 16, 17], из них при использовании приближенных оценок целесообразно выбрать методику [16], в которой на инженерном уровне учитываются фазовые переходы компонентов.

В общем случае скорость подъема термика определяется на основе решения уравнения

$$\frac{d}{d\tau}(M + \Pi)(1 - \beta_0)v = F_A - F_c,$$

где  $M$  – масса облака ПС;  $\Pi$  – присоединенная масса воздуха;  $\beta_0$  – степень расширения облака ПС;  $v$  – скорость подъема облака;  $F_A$  – сила Архимеда;  $F_c$  – сила сопротивления среды.

Методика<sup>1</sup> позволяет рассчитать скорость, массу, температуру облака с учетом эжекции и конденсации для использования в качестве опорных параметров на начальных этапах исследований.

4. Для оценки зон рассеивания ПС в атмосфере большое значение имеет конечная высота подъема облака, которая определяется как высота, на которой значение вертикальной скорости подъема облака мало по сравнению со скоростью ветра. На основе теории распространения турбулентных затопленных струй предложена следующая зависимость [13]:

$$H = 3,75 \frac{RW}{u_{10}} \left[ 1 + 1,3 \frac{R\Delta T}{u_{10}^2 T_a} \right],$$

где  $R$ ,  $W$ ,  $u_{10}$ ,  $\Delta T$  – соответственно начальный радиус облака, начальная скорость подъема облака и скорость ветра на высоте 10 м, температурный перегрев.

Анализ показывает, что зависимости такого вида могут использоваться в расчетном алгоритме ИУС «Экология».

5. Рассеивание ВК в атмосфере. В настоящее время существует несколько расчетных методик для определения распространения компонентов выбросов в атмосфере. Методика<sup>2</sup> предназначена для расчета рассеивания в атмосфере выбросов от промышленных предприятий. Она содержит большой набор расчетных формул и рекомендаций и использовалась при отработке функциональной модели регулятора.

Исходя из перечисленных выше факторов, определяющих динамику подъема и рассеивания облака ПС, может быть принят следующий подход к разработке функциональной модели облака ПС:

1. Исходя из диаграммы давления  $p(\tau)$  и расходной характеристики ВЭЗ выбираются временные участки для расчета параметров отдельных слоев облака ПС.

2. Для каждого расчетного участка, исходя из баланса масс воды и ВК, осажденных в рабочей зоне стенда, определяются массы и концентрации ВК и воды (пара) в составе облака ПС.

3. На основе расчетов и результатов экспериментального измерения определяются начальные параметры облака ПС: температура  $T_0$ , вертикальная скорость  $W$ , радиус  $R_0$ .

<sup>1</sup> ОНД–86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 68 с.

<sup>2</sup> Там же.

4. По начальным параметрам облака определяются конечная высота подъема каждого слоя облака, начальные концентрации ВК в облаке ПС, зоны рассеивания ВК.

5. Полученные высоты и содержание ВК в пределах этих зон сравниваются с ПДК и результатами экологического наземного контроля санитарно-защитной и селитебных зон.

При определении базовых параметров процессов используются следующие зависимости:

Баланс масс по воде,  $Al_2O_3$  и  $HCl$  определен следующим образом:

– для технологических стоков  $m_B^{OC}, m_{OA}^{OC}, m_{XB}^{OC}$  – по результатам аналитического контроля;

– для облака ПС в целом

$$m_B^a = m_B^\Sigma - m_B^{OC},$$

$$m_{OA}^a = m_{OA}^\Sigma - m_{OA}^{OC},$$

$$m_{XB}^a = m_{XB}^\Sigma - m_{XB}^{OC},$$

$$m_{ПС}^a = m_3 + m_B^a - (m_{OA}^{OC} + m_{XB}^{OC}).$$

Для каждого временного участка  $\tau_i$ :

– определяется масса сгоревшего заряда как  $m_{ПС_i} = \int_{\tau_i} AP(\tau)F_{кр}(\tau)d\tau$ , где  $F_{кр}(\tau)$  – площадь критического сечения заряда;

$A$  – коэффициент согласования;

– определяются коэффициенты масс  $K_{\tau_i} = \frac{m_{ПС_i}}{m_3}$ ;

– определяется содержание  $Al_2O_3$  и  $HCl$  в  $i$ -й части облака:

$$m_{OA_i}^a = m_{OA}^a \cdot K_{\tau_i},$$

$$m_{XB_i}^a = m_{XB}^a \cdot K_{\tau_i};$$

– определяются секундные массовые расходы  $Al_2O_3$  и  $HCl$ :

$$\dot{m}_{OA_i}^a = \frac{m_{OA_i}^a}{\tau_i},$$

$$\dot{m}_{\text{XB}_i}^a = \frac{m_{\text{XB}_i}^a}{\tau_i}$$

и объемные расходы  $\dot{V}_{\text{OA}_i}$ ,  $\dot{V}_{\text{XB}_i}$ .

Высота подъема  $i$ -й части облака находится по формуле

$$H_i = \frac{AWR}{u} \left[ B + \frac{CgR(T_0 - T_a)}{T_a u^2} \right], \quad (4)$$

где  $W$ ,  $R$ ,  $T_0$  – начальная вертикальная скорость подъема, радиус и температура облака ПС;  $u$  – скорость ветра;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – коэффициенты согласования, которые определяются по экспериментальным данным на предварительных СтС;  $T_a$  – температура атмосферы.

Расчет зон рассеивания и концентраций ВК определяется для каждого слоя облака ПС с учетом рекомендаций [18] по зависимостям.

1. Максимальная концентрация  $c_m$  для каждого  $i$ -го ВК:

$$c_m = \frac{AMFm\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}.$$

Коэффициенты, входящие в эту зависимость, определяют следующие факторы:  $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы;  $M$  – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с;  $F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе;  $m$  и  $n$  – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса;  $H$  – высота источника выброса над уровнем земли, м;  $\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км,  $\eta = 1$ ;  $\Delta T$  – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси  $T_r$  и температурой окружающего атмосферного воздуха  $T_b$ , °С;  $V_1$  – расход газовой смеси, м<sup>3</sup>/с.

Принимаются в соответствии с рекомендациями<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> ОНД–86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий.

2. Расстояние  $x_m$  от источника выбросов, на котором приземная концентрация  $c$  ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения  $c_m$ , определяется по формуле

$$x_m = \frac{5-F}{4} dH,$$

где  $d$  – коэффициент согласования.

3. Максимальное значение приземной концентрации вредного вещества  $c_{m_u}$  ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) при неблагоприятных метеорологических условиях и скорости ветра  $u$

$$c_{m_u} = r c_m,$$

где  $r$  – безразмерная величина, определяемая в зависимости от отношения  $u/u_m$  по формулам

$$r = 0,67(u/u_m) + 1,67(u/u_m)^2 - 1,34(u/u_m)^3$$

при  $u/u_m \leq 1$ ,

$$r = \frac{3(u/u_m)}{2(u/u_m)^2 - (u/u_m) + 2}$$

при  $u/u_m > 1$ .

Расстояние от источника выброса  $x_{m_u}$  (м), на котором при скорости ветра  $u$  и неблагоприятных метеорологических условиях приземная концентрация вредных веществ достигает максимального значения  $c_{m_u}$  ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ), определяется по формуле

$$x_{m_u} = p x_m,$$

где  $p$  – безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения  $u/u_m$  по формулам

$$p = 3 \text{ при } u/u_m \leq 0,25;$$

$$p = 8,43(1 - u/u_m)^3 + 1 \text{ при } 0,25 < u/u_m \leq 1;$$

$$p = 0,32u/u_m + 0,68 \text{ при } u/u_m > 1.$$

Для *идентификации* расчетных зависимостей параметров облака и зон рассеивания целесообразно использовать:

– количество вошедших в состав облака ПС, ВК и воды, определяемое расчетом по данным контроля состава технологических стоков в бассейне-отстойнике;

– высоты подъема слоев облака для разных участков горения заряда в зависимости от степени орошения струи; при проведении СтС эти высоты определяются средствами инструментально-приборного контроля на основе разработанной методики, при проектировании – по зависимости вида (4);

– зоны рассеяния и концентрация ВК в приземном слое атмосферы на границе СЗЗ, которые:

а) могут быть определены расчетным путем, исходя из состава и высоты подъема облака. При этом проведение расчета позволяет определить зоны рассеяния ВК, величину и координаты максимальных концентраций в зависимости от скорости ветра при проведении СтС;

б) контролируются в процессе проведения СтС с помощью передвижных лабораторий мониторинга.

Особенность идентификации параметров облака ПС состоит в том, что если состав облака ПС может быть рассчитан достаточно точно по результатам аналитического контроля бассейна отстойника, то замеры высоты содержат значительные неопределенности за счет условности понятия «высота», поскольку протяженность отдельных слоев облака на высоте составляет 50–70 м, а замеры содержания ВК в приземном слое атмосферы вообще не могут быть использованы для количественной идентификации необходимых функциональных зависимостей, так как зависят от степени попадания контролирующей лаборатории в зону «следа» облака. Тем не менее результаты экологического контроля можно использовать при проведении факторного анализа и для сравнительной оценки расчета и множества контрольных замеров, полученных при СтС.

Состав и содержание компонентов облака ПС определяются по балансу масс с учетом эффективности осаждения ПС, ВК и воды в рабочей зоне стенда.

Высота подъема облака может определяться по зависимости вида (4), в которой начальные параметры облака ПС  $R$ ,  $W$  и  $T_0$  замеряются при проведении СтС, а скорость ветра и температура воздуха также

контролируются. Неудобство этой формулы состоит в том, что высота подъема  $H$  значительно зависит от скорости ветра, причем при  $u \rightarrow 0$   $H \rightarrow \infty$  и формула не идентифицируется при  $u = 0$ , т.е. для условий штиля.

Кроме того, в рекомендуемом в работе [13] виде данная формула не дает достаточно хорошей сходимости для высот подъема облака при СтС вследствие действия ряда факторов, зависящих от водосодержания облака, в частности:

- изменяются, по сравнению с «сухими» СтС, габариты облака, его плавучесть и коэффициент аэродинамического сопротивления;
- внешний и внутренний тепломассообмен дополняется тепловыделением при конденсации водяного пара и т.д.

Тем не менее три степени свободы формулы (7) по коэффициентам  $A$ ,  $B$ ,  $C$  позволяют использовать ее для идентификации с учетом переменных  $\Delta T$ ,  $u$  и  $W$ .

В частности, для параметров облака, приведенных в табл. 3, эта зависимость может быть записана в виде

$$H = 4,5 \frac{WR}{(1+u)} \left[ 1 + 3,3 \frac{gR}{(1+u)^2} \cdot \frac{\Delta T}{T} \right]. \quad (5)$$

Таблица 3

Параметры облака ПС при  $u = 1$  м/с

Параметр	Вариант СтС	
	с ВЭЗ	без ВЭЗ
$R$ , м	6	3,25
$W$ , м/с	6	10
$\Delta T$ , К	30	140
$T$ , К	303	343
$H$ , м	500	900

Результаты СтС зарядов с массой от 6,0 до 50,0 т подтверждают расходимость этой зависимости от опыта ниже 10 %.

*Концентрация и зоны рассеивания ВК.* Анализ показывает, что расчетные зависимости для оценки концентраций ВК в приземном слое атмосферы могут использоваться и для оценки экологических рисков при проведении СтС. При этом величина коэффициентов, входящих в эту зависимость, составляет:  $A = 300$ ,  $F = 3,0$  для  $Al_2O_3$ ;  $F = 2,5$

для HCl;  $m = 1,1$ ,  $\eta = 1$ ,  $n = 1,5 \cdot 10^{-2}$ ,  $d = 5,17$  для  $Al_2O_3$ ;  $d = 4,67$  для HCl. Все другие параметры –  $M$ ,  $V$ ,  $\Delta T$ ,  $H$  – определяются из баланса масс и других параметров облака.

*Чувствительность к входным параметрам.* На основе приведенных выше зависимостей проведено сквозное моделирование параметров струи и облака ПС для исследования влияния изменений расходной характеристики ВЭЗ  $G_B(x, \tau)$  на рассеивание ВК. Результаты представлены на графиках рис. 12, 13 и показывают следующее:

- концентрации ВК  $c_i$  зависят от расходной характеристики  $G_B(x, \tau)$ , при этом при среднем расходе  $G_B(x, \tau) = 2,0$  т/с достигают минимума. Однако при снижении расхода воды до 1,5 т/с концентрации как  $Al_2O_3$ , так и HCl увеличиваются незначительно и не превышают ПДК;

- зависимость концентрации от расхода воды не является монотонной и должна исследоваться для каждого двигателя на всем диапазоне изменения расходной характеристики;

- увеличение степени орошения струи ПС сдвигает координату максимума концентраций  $c_{mi}$  в сторону рабочей зоны стенда и наоборот, что должно учитываться при выборе расходной характеристики и назначении границ СЗЗ;

- координата максимума концентрации  $x_m$  для HCl расположена дальше от стенда, чем для  $Al_2O_3$ , что необходимо учитывать при определении границ СЗЗ;

- при увеличении среднего расхода воды масса выбросов ВК в атмосферу снижается (см. ниже).

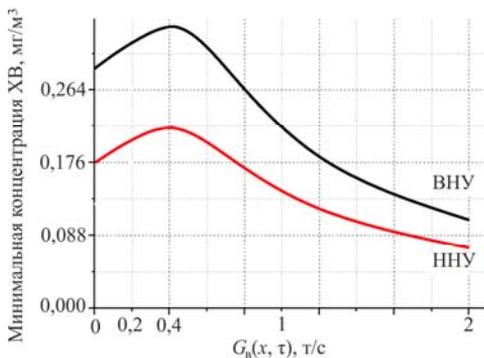


Рис. 12. Максимальная концентрация HCl на ВНУ и ННУ в зависимости от среднего расхода воды  $G_B(x, \tau)$

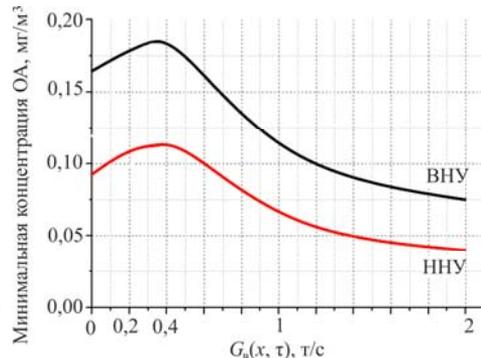


Рис. 13. Максимальная концентрация  $Al_2O_3$  на ВНУ и ННУ в зависимости от среднего расхода воды  $G_B(x, \tau)$

Суммарные выбросы компонентов ПС в атмосферу

$G_b(x, \tau)$ , т/с	0	0,2	0,4	1	2
$m_{ПС}$ , т	11,58	10,59	9,59	6,60	3,95
$m_{ОА}$ , т	9,37	8,62	7,86	5,61	3,23
$m_{ХВ}$ , т	2,22	1,97	1,73	0,99	0,71

*Адаптируемость.* При проектировании ИУС все контрольные параметры облака ПС определяются расчетным путем и затем первично идентифицируются по результатам установочных СтС. По мере проведения СтС и набора статистических данных проводится уточнение всех контрольных параметров и определение величины их рассеяния, что позволяет снижать экологические риски за счет корректировки расходной характеристики по уточненным данным.

Выходные параметры облака ПС обуславливают величину экологического риска  $R_i^0$ , определяемого по каждому  $i$ -му ВК как  $R_i = \text{Вер}(c_i > [c_i])$ , где  $[c_i]$  – допустимая величина концентрации  $i$ -го ВК.

Эти оценки могут быть проведены:

- по результатам численного моделирования параметров струи и облака ПС;
- по результатам экологического контроля при проведении СтС.

В обоих случаях концентрация  $c_i$  рассматривается как случайная величина, распределенная по некоторому заданному закону.

При допущении о нормальности статистического распределения  $c_i$  величина риска может быть определена по зависимости

$$R_i = \Phi\left(\frac{m_{c_i} - [c_i]}{\sigma_{c_i}}\right),$$

где  $\Phi$  – табулированная функция Лапласа;  $m_{c_i}$ ,  $\sigma_{c_i}$  – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение замеренных концентраций  $c_i$ .

При расчетной оценке величину  $m_{c_i}(G_b(x, \tau))$  принимают как точечный результат расчета, а  $\sigma_{c_i}$  – по результатам анализа ошибок расчета [18] и по статистическим данным, полученным при СтС двигателей-аналогов.

В табл. 4 приведены результаты расчетных оценок экологического риска по НС1 в зависимости от степени орошения струи.

Таблица 4

Влияние расхода воды на экологический риск по НС1

Расход воды, т/с		0,0	0,2	0,4	1	2
Величина риска	ВНУ	0,50	0,84	0,99	0,16	0,023
	ННУ	$10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-6}$

Из табл. 4 видно, что снижение суммарного расхода воды ниже 1,0 т/с на высоконапорном участке значительно увеличивает экологический риск. Вместе с тем для низконапорного участка имеются значительные резервы для такого снижения.

**Заключение**

На основе инженерных физико-математических моделей предложена методология описания термогазодинамических процессов, происходящих при огневой утилизации зарядов крупногабаритных РДТТ на открытом стенде с использованием водной экологической защиты.

Предложенные модели позволяют:

- контролировать основные параметры процессов, определяющих формирование и рассеивание облака ПС в атмосфере и концентрацию ВК в приземном слое атмосферы;
- выбирать конструкцию и расходную характеристику ВЭЗ по воде с учетом внутрибаллистических параметров заряда, особенностей его горения при проведении СтС РДТТ без выходного блока;
- проводить идентификацию и последовательное уточнение моделей по результатам СтС и оценивать экологические риски с учетом физических неопределенностей процессов.

**Библиографический список**

1. Попова М.В., Литвинов А.В., Козлов С.Н. Информационная структура контроля и обеспечения экологической безопасности при огневой утилизации крупногабаритных зарядов РДТТ на открытом стенде // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2013. – № 35. – С. 5–20.

2. Шевырин А.Ю., Лебедев А.С. Оценка параметров струи продуктов сгорания твердого топлива крупногабаритных ракетных двигателей при их ликвидации методом открытого сжигания // Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение: материалы IV Междунар. конф. «NEMS – 2008» (Белокураха, 3–5 сентября 2008 г.). – Бийск, 2008. – С. 189.

3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Гостехиздат, 1953. – 736 с.

4. Гинзбург И.П. Прикладная гидрогазодинамика – Л.: Изд-во Ленинград. гос. ун-та, 1958. – 338 с.

5. Особенности процессов при запуске энергетических установок без выходных блоков / В.И. Марьяш, В.С. Аверин, А.А. Назаров [и др.] // Материалы всерос. науч.-практ. конф. ФГУП ФНПЦ «Алтай» (Бийск, 26–28 сентября 2001 г.). – Бийск, 2003. – С. 28–33.

6. Гребенкин В.И., Павлов А.Д., Шмачков Е.А. Итоги экспериментальных бессопловых сжиганий РДТТ и перспективы исследований в обеспечение отработки технологии их утилизации // Материалы всерос. науч.-практ. конф. ФГУП ФНПЦ «Алтай» (Бийск, 26–28 сентября 2001 г.). – Бийск, 2003. – С. 21–24.

7. Определение температурных параметров факела продуктов сгорания и его воздействия на элементы конструкции двигателя и стенда при бессопловом сжигании / В.И. Гребенкин, А.Д. Павлов, Е.А. Шмачков [и др.] // Материалы всерос. науч.-практ. конф. ФГУП ФНПЦ «Алтай» (Бийск, 26–28 сентября 2001 г.). – Бийск, 2003. – С. 57–60.

8. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: учеб. пособие для неэнергетич. специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1975. – 496 с.

9. Мамонтов М.А. Вопросы термодинамики тела переменной массы. – М.: Оборонгиз, 1962. – 102 с.

10. Жигульский А.И., Крюков В.Г., Литвинов А.В. Интенсификация процессов абсорбции при водном орошении струи продуктов сгорания РДТТ // Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение: материалы IV Междунар. конф. «NEMS – 2008» (Белокураха, 3–5 сентября 2008 г.). – Бийск, 2008. – С. 193.

11. Диментова А.А. Таблицы газодинамических функций: справ. пособие. – М.: Машиностроение, 1966. – 138 с.

12. Газодинамические параметры струи при внешнем орошении ее водой / С.Н. Козлов, М.В. Попова, А.В. Литвинов, А.В. Скворцов // Материалы всерос. науч.-техн. конф. «Информационные технологии в науке, экономике и образовании» (Бийск, 22–23 сентября 2011 г.). – Бийск, 2011. – С. 36–41.

13. Математическое моделирование горения и взрыва высокоэнергетических систем: монография / под ред. И.М. Васенина. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – 322 с.

14. Полуэмпирическая модель процессов, происходящих при образовании и распространении высокодисперсных аэрозолей окислов алюминия при открытом сжигании крупногабаритных РДТТ / С.Э. Пашенко, А.Е. Осоченко, В.Е. Зарко [и др.] // Материалы всерос. науч.-практ. конф. ФГУП ФНПЦ «Алтай» (Бийск, 26–28 сентября 2001 г.). – Бийск, 2003. – С. 83–97.

15. Динамика подъема облака продуктов сгорания при огневой утилизации зарядов твердотопливных энергоустановок на открытом стенде. Процессы и их идентификация / В.П. Лушев, А.В. Литвинов, Н.Ю. Демидов, С.Н. Козлов, В.В. Рейно // Оптика атмосферы и океана. – Новосибирск, 2014. – Т. 27, № 10. – С. 917–924.

16. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.

17. Воздействие на окружающую среду кратковременных выбросов большой мощности: учеб. пособие / В.М. Суслонов, Н.Г. Максимович, В.Н. Иванов, В.А. Шкляев; Перм. гос. ун-т. – Пермь, 2005. – 126 с.

18. Ситуационный анализ экологических рисков при сжигании твердотопливных зарядов энергетических установок на открытом стенде / М.В. Попова, А.В. Литвинов, С.Н. Козлов, В.П. Лушев // Известия Том. политехн. ун-та. – 2013. – Т. 322, № 1. – С. 157–161.

## References

1. Popova M.V., Litvinov A.V., Kozlov S.N. Informatsionnaya struktura kontrolya i obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti pri ognevoy utilizatsii krupnogabaritnykh zaryadov RDTT na otkrytom stende [Information structure of control and provision of ecological safety at the firing utilization of large-size SRM charges at an open bench]. *Vestnik Permskogo*

*natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika*, 2013, no. 35, pp. 5-20.

2. Shevyrin A.Yu., Lebedev A.S. Otsenka parametrov strui produktov sgoraniya tverdogo topliva krupnogabaritnykh raketnykh dvigateley pri ikh likvidatsii metodom otkrytogo szhiganiya [Evaluation of jet parameters of solid propellant combustion products of large-size SRM charges on their utilization by open firing]. *Materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii "HEMS – 2008" "Vysokoenergeticheskie materialy: demilitarizatsiya, anti-terrorizm i grazhdanskoe primenenie"*. Biysk, 2008, p. 189.

3. Abramovich G.N. *Prikladnaya gazovaya dinamika* [Applied gas dynamics]. Moscow: Gostekhizdat, 1953. 736 p.

4. Ginzburg I.P. *Prikladnaya gidrogazodinamika* [Applied hydro-gasdynamics]. Leningradskiy gosudarstvennyy universitet, 1958. 338 p.

5. Maryash V.I., Averin V.S., Nazarov A.A. [et al.]. Osobennosti protsessov pri zapuske energeticheskikh ustanovok bez vykhodnykh blokov [Features of processes on firing propulsions without nozzles]. *Materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii FGUP FNPTs "Altay"*. Biysk, 2003, p. 28-33.

6. Grebenkin V.I., Pavlov A.D., Shmachkov E.A. Itogi eksperimentalnykh bessoplovykh szhiganiy RDTT i perspektivy issledovaniy v obezpechenii otrabotki tekhnologii ikh utilizatsii [Results of experimental firings of SRM without nozzles and research prospects of finishing their utilization technology]. *Materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii FGUP FNPTs "Altay"*. Biysk, 2003, p. 21-24.

7. Grebenkin V.I., Pavlov A.D., Shmachkov E.A. [et al.] Opredelenie temperaturnykh parametrov fakela produktov sgoraniya i ego vozdeystviya na elementy konstruksii dvigatelya i stenda pri bessoplovom szhiganii [Determination of temperature parameters of combustion products plume and its influence on engine construction elements and test bench at nozzle-free firing]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii FGUP FNPTs "Altay"*. Biysk, 2003, p. 57-60.

8. Nashchokin V.V. *Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha* [Technical thermodynamics and heat transfer]. Moscow: Vysshaya shkola, 1975. 496 p.

9. Mamontov M.A. *Voprosy termodinamiki tela peremennoy massy* [Problems of thermodynamics of varying mass body]. Moscow: Oborongiz, 1962. 102 p.

10. Zhigulskiy A.I., Kryukov V.G., Litvinov A.V. Intensifikatsiya protsessov absorptsii pri vodnom oroshenii strui produktov sgoraniya RDTT [Intensification of absorption processes on water irrigation of SRM combustion products jet]. *Materialy IV Mezhdunarodnoy konferentsii "HEMS – 2008" "Vysokoenergeticheskie materialy: demilitarizatsiya, antiterrorizm i grazhdanskoe primenenie"*. Biysk, 2008, p. 193.

11. Dimentova A.A. Tablitsy gazodinamicheskikh funktsiy [Tables of gasdynamic functions]. Moscow: Mashinostroenie, 1966. 138 p.

12. Kozlov S.N., Popova M.V., Litvinov A.V., Skvortsov A.V. Gazodinamicheskie parametry strui pri vneshnem oroshenii ee vodoy [Gasdynamic jet parameters at its external irrigation]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Informatsionnye tekhnologii v nauke, ekonomike i obrazovanie"*. Biysk, 2011, p. 36-41.

13. Matematicheskoe modelirovanie goreniya i vzryva vysokoenergeticheskikh sistem [Mathematical modeling of combustion and explosion of high energy systems]. Ed. I.M. Vasenin. Tomskiy universitet, 2006. 322 p.

14. Pashchenko S.E., Osochenko A.E., Zarko V.E. [et al.]. Poluempiricheskaya model protsessov, proiskhodyashchikh pri obrazovanii i rasprostranenii vysokodispersnykh aerorozoley okislov alyuminiya pri otkrytom szhiganiy krupnogabaritnykh RDTT [Semiempirical model of processes occurring on formation and propagation of highly dispersed aerosol of aluminum oxides at open firing of large-size SRM]. *Materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii FGUP FNPTs "Altay"*. Biysk, 2003, p. 83-97.

15. Lushev V.P., Litvinov A.V., Demidov N.Yu., Kozlov S.N., Reyno V.V. Dinamika podema oblaka produktov sgoraniya pri ognevoy utilitatsii zaryadov tverdotoplivnykh energoustanovok na otkrytom stende. Protsessy i ikh identifikatsiya [Dynamics of lifting combustion products cloud when firing utilization of propulsion solid propellant charges at an open test bench]. *Optika atmosfery i okeana*. Novosibirsk, 2014, vol. 27, no. 10, pp. 917-924.

16. Berlyand M.E. Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery [Prediction and control of atmosphere pollution]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1985. 272 p.

17. Suslonov V.M., Maksimovich N.G., Ivanov V.N., Shklyayev V.A. Vozdeystvie na okruzhayushchuyu sredyu kratkovremennykh vybrosov bolshoy moshchnosti [Influence of short-term exhausts of high power on the environment]. Permskiy gosudarstvennyy universitet, 2005. 126 p.

18. Popova M.V., Litvinov A.V., Kozlov S.N., Lushev V.P. Situatsionnyy analiz ekologicheskikh riskov pri szhiganii tverdotoplivnykh zaryadov energeticheskikh ustanovok na otkrytom stende [Situational analysis of ecological risks on firing of solid propellant propulsion plants at an open test bench]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2013, vol. 322, no. 1, pp. 157-161.

### Об авторах

**Попова Мария Владиславовна** (Бийск, Россия) – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер ОАО ФНПЦ «Алтай» (659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, д. 1, e-mail: popova.maria.v@gmail.com).

**Литвинов Андрей Владимирович** (Бийск, Россия) – кандидат технических наук, заместитель генерального директора – директор – главный конструктор по НИОКР ОАО ФНПЦ «Алтай» (659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, д. 1, e-mail: post@frpc.secna.ru).

**Козлов Станислав Николаевич** (Бийск, Россия) – кандидат технических наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели и высокоэнергетические устройства автоматических систем» Бийского технологического института (филиала) ФГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (659305, г. Бийск, ул. Трофимова, д. 27, e-mail: magistrus@city.biisk.ru).

### About the authors

**Mariya V. Popova** (Biysk, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Lead Engineer, OJSC “Altay” (1, Sotsyalisticheskaya st., Biysk, 659322, Russian Federation, e-mail: popova.maria.v@gmail.com).

**Andrey V. Litvinov** (Biysk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Deputy Director General – Director, OJSC “Altay” (1, Sotsyalisticheskaya st., Biysk, 659322, Russian Federation, e-mail: post@frpc.secna.ru).

**Stanislav N. Kozlov** (Biysk, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Professor, Department of Rocket Engines and High-energy Devices of Automatic Systems, Biysk Technological Institute (27, Trofimova st., Biysk, 659305, Russian Federation, e-mail: magistrus@city.biisk.ru).

Получено 2.03.2015